Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 2, May-June 2024, p. 199-216

Evaluation the Performance of Drying Efficiency and Energy Efficiency of a Solar Dryer Quipped with Phase Change Materials and Air Recirculation System

M. Ahmadi[1], H. Samimi Akhijahani [2*], P. Salami[3]

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Bio Systems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

Received: 27.11.2022 Revised: 10.03.2023 Accepted: 22.05.2023 Available Online: 23.05.2023	**How to cite this article:** Ahmadi, M., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2024). Evaluation the performance of drying efficiency and energy efficiency of a solar dryer quipped with phase change materials and air recirculation system. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 20*(2), 199-216. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79695.1218

Introduction

Solar energy is one of the sources of renewable energy that can be used in both buildings, industry and agriculture in the form of heat or electrical energy. According to previous researches, energy consumption in the world is doubling every 20 years. However, the use of renewable energy is still less than fossil fuels, which has caused environmental problems in the world. In recent decades, the tendency to use renewable energy, especially solar energy, has increased. A significant portion of the world's energy (about 30%) is spent on agriculture, and about 3.62% is used to dry agricultural products (Iranmanesh *et al.*, 2020). However, thermal and drying efficiency of the solar collectors are not in acceptable range. Applying different ways to improve the performance of solar dryers such as using thermal energy storage system, air recirculation mechanism and using desiccant system. In this paper, phase change materials were placed vertically in consecutive rows at different distances inside the collector and the thermal performance of the collector was investigated. Also, the drying process of Oleaster were evaluated using PCM and air recirculation system.

Materials and Methods

The indirect solar dryer used in this study includes the chassis, flat plate collector, electric fan, drying cabinet, pipes containing PCM and sensors. 25 copper tubes containing PCM are placed on the absorber plate with fixed intervals. The insulated cabinet of the dryer has three trays. A 220 volt 60 W electric fan is placed in the inlet of the collector and causes to flow air inside the system. The process of drying Oleaster in a solar dryer was carried out for 9 consecutive days in August 1401. The drying process was performed at three positions of PCM pipes at 5, 10 and 15 cm intervals with air flow rate of 0.5, 1 and 2 m/s. The drying kinetics of Oleaster was investigated using five mathematical models considering drying time and related constants. The selected model is selected based on the degree of fit (the highest R^2 and the lowest RMSE) on the experimental data. Thermal efficiency was calculated according to ASHRAE standard 2003 (Eltawil *et al.*, 2018). Moreover, to determine the drying efficiency the amount of energy required to heat the dryer and the product and extract water from the Oleaster and the total energy (electrical and thermal) input to the dryer was considered. SCE is defined as the energy required to dry one kilogram of the product.

Results and Discussion

The drying time of the product by the dryer is reduced from 2.09 to 4.16% on average by changing the position of PCM from 5 cm to 15 cm. On the other hand, with the increase of air velocity from 0.5 to 2 m/s, the drying time decreased from 8.32% to 16.64%. Henderson and Pabis model was the best model to describe and define the drying

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79695.1218

process of Oleaster with solar dryer. The curves of the drying rate against the time in different conditions illustrated that in the initial stage of drying of samples. The amount of moisture evaporation is high due to the high water content in Oleaster, and a major part of the drying process took place in this period. The value of SEC for the dryer without PCM was 4.26 MJ/kg, while for the case with PCM, it was 2.04 MJ/kg with a distance of 15 cm. By increasing the distance between the tubes, the drying efficiency increases due to the reduction of drying time and energy consumption. In this case, the consumption of electrical energy by the fan (for fluid flow in the dryer and collector) and the thermal energy input to the dryer are reduced. However, with the increase of air speed from 1 m/s to m/s^2, there is a significant reduction in drying efficiency. The highest drying efficiency was 36.72% and the lowest was 25.65% for distance 15 cm, air velocity of 1 m/s and distance 5 cm, air speed 2 m/s, respectively. Drying efficiency was improved by at least 12% using PCM.

Conclusion

In this research, the analysis of the thermal process in the solar dryer system in three positions of the tubes containing PCM inside the flat plate collector for the distances of 5, 10 and 15 cm between the tubes at three air velocities of 0.5, 1 and 2 m/s was investigated. Using the return flow system and the phase changing material at the same time improved the thermal efficiency of the flat plate collector by 19.12%.

Keywords: Oleaster, Phase change materials, Recirculation system, Thermal efficiency

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۱۶-۱۹۹

ارزیابی عملکرد خشک کردن و بازده انرژی خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی

محدثه احمدی[۱]- هادی صمیمی اخیجهانی[۲*]- پیمان سلامی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

جمع‌کننده خورشیدی تخت یکی از اجزای مهم سامانه‌های جاذب انرژی خورشیدی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی است. در این تحقیق در درون جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت از مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت لوله‌ای استفاده شد. این لوله‌ها در پنج ردیف پنج تایی به فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر روی ردیف‌ها قرار گرفتند. برای ارزیابی عملکرد حرارتی سه سرعت هوا ($m.s^{-1}$ ۰/۵، ۱ و ۲) و برای ارزیابی عملکرد خشک کردن محصول سنجد در نظر گرفته شد. رطوبت این نمونه‌ها برای آسیاب نمودن بایستی به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسید. برای مدلسازی سینتیک خشک شدن، پنج مدل ریاضی به داده‌های خشک شدن برازش شد و مدل هندرسون و پاپیس با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۹۷ و ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از ۰/۰۵ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. تأثیر سرعت هوا نسبت به جایگاه قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده بر خشک شدن بیشتر بود. با بررسی بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی این نتیجه حاصل شد که بهترین بازده حرارتی در سرعت هوای ۲ $m.s^{-1}$ با PCM به فواصل ۱۵cm به میزان ۵۶/۲۹ درصد اتفاق می‌افتد. در این حین بیشترین بازده خشک کردن نیز ۳۶/۷۲٪ به‌دست آمد. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه سامانه جریان بازگشتی اثر منفی بر کیفیت محصول خشک شده نداشت.

واژه‌های کلیدی: بازده حرارتی، سامانه جریان بازگشتی، سنجد، مواد تغییر فاز دهنده

مقدمه

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه‌ی تأمین آن می‌باشد. با توجه به تداوم نرخ جمعیت و افزایش مصرف مواد غذایی و اتمام سوخت‌های فسیلی و هم‌چنین افزایش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان ۸ ppm در سال)، تحقیقات اخیر را به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. اکثر محصولات کشاورزی و بیولوژیکی، دارای رطوبتی در حدود ۲۵ الی ۸۰ درصد می‌باشند و به‌دلیل رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها، برای نگه‌داری طولانی مدت مناسب نیستند. یکی از روش‌های مناسب و قدیمی به منظور نگه‌داری طولانی مدت محصولات کشاورزی، خشک کردن آنها می‌باشد. حدود ۳۰ درصد از انرژی جهان صرف بخش کشاورزی می‌شود و از این مقدار، ۳/۶۲ درصد برای فرآیند خشک کردن استفاده می‌شود (Iranmanesh *et al.*, 2017). طبق مطالعات انجام شده ۱۵ درصد جمعیت جهان دچار سوء تغذیه هستند و خشک کردن محصولات کشاورزی که باعث جلوگیری از اتلاف بیش از ۲۳ درصد محصول تولید شده می‌گردد، می‌تواند راه حل مناسبی در جهت مدیریت منابع غذایی باشد (Motahayyer *et al.*, 2019). به‌دلیل معضلات زیست‌محیطی و تبعات ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، تمایل به انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک نظیر انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشیار و استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.samimi@uok.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79695.1218

کشاورزی در حال افزایش است. انرژی خورشیدی یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر رایگان، در دسترس، پاک و فراوان است. انرژی خورشیدی در انواع سامانه‌ها مانند آبگرمکن‌های خورشیدی، نیروگاه‌های حرارتی تولید برق (دودکش‌ها و هیلوستات‌های خورشیدی) و خشک‌کن‌های خورشیدی کاربرد دارد. دستگاه‌های خشک‌کن خورشیدی یکی از سامانه‌های خورشیدی است که به صنایع غذایی بسیار کمک می‌کند تا از طریق کاهش رطوبت و جلوگیری از ایجاد میکروارگانیسم‌ها از مواد غذایی محافظت نماید. انرژی خورشیدی به‌دلیل در دسترس بودن و فراوانی پایدار با ارزش‌ترین منبع انرژی‌های تجدیدپذیر بوده (Chamoli *et al*., 2012) و براساس ماهیت استفاده به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rashidi *et al*., 2018). در خشک‌کن‌های خورشیدی هر دو روش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. خشک کردن به روش سنتی، قدیمی‌ترین روش خشک کردن محصولات است که در این نوع خشک کردن، محصولات مستقیماً در معرض نور آفتاب قرار گرفته و با گذشت زمان، رطوبت خود را از دست می‌دهد. این نوع روش خشک کردن دارای معایبی نظیر: زمان طولانی فرآیند خشک کردن، از بین رفتن مقدار زیادی ویتامین و مواد معدنی محصول در اثر تابش مستقیم تشعشع خورشیدی، از بین رفتن بخشی از محصول و آلوده شدن محصول ناشی از آب و هوای نامساعد و پرندگان و حشرات و نیاز به سطح زیاد برای خشک کردن می‌باشد. در این حالت محصول خشک شده پس از جمع‌آوری از مزرعه برای زدودن غبار، گرد و خاک و حشرات دوباره در معرض شستشو قرار گرفته و در نتیجه فرآیند فرآوری طولانی می‌گردد. استفاده و توسعه‌ی خشک‌کن های خورشیدی این محدودیت‌ها را کاهش می‌دهد.

از آنجا که فرآیند خشک کردن به انرژی بالایی نیاز دارد، منابع انرژی جایگزین با قابلیت تجدیدپذیر بودن، بهترین گزینه برای تأمین انرژی در خشک‌کن‌های صنعتی می‌باشد. بنابراین، با توجه به مشکلات موجود در خشک کردن سنتی (طولانی شدن فرآیند خشک شدن و تمیزی محصول) و متداول به روش هوای گرم (هزینه خشک شدن بالا و عدم تأمین انرژی)، خشک‌کن‌های خورشیدی مناسب‌ترین گزینه برای رطوبت‌زدایی محصول می‌باشد.

خشک‌کن‌های خورشیدی علی‌رغم تأمین انرژی رایگان به دلایلی نظیر عدم خشک شدن متعادل محصول و عدم در دسترس بودن در طول شب و روزهای ابری کمتر مورد استقبال تولیدکنندگان محصولات خشک شده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن با وجود در دسترس بودن و هزینه‌ی کم خشک‌کن‌های خورشیدی، بازده حرارتی خشک‌کن‌های خورشیدی نسبت به سایر خشک‌کن‌ها پایین است. ارائه تمهیداتی مانند استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی (Ebrahimi *et al*., 2021)، سامانه‌های جریان بازگشتی (Gertzos & Caouris, 2007)، استفاده از موانع درون جمع کننده (Salami, 2016) و سامانه‌های جاذب رطوبت (Dorouzi *et al*., 2018 ; Rashidi *et al*., 2021) می‌تواند تا حدودی نقصان مربوط به بازده حرارتی و خشک کردن را جبران نماید. استفاده از سامانه‌های ذخیره کننده حرارتی یکپارچه در کلکتورهای خورشیدی، یک روش مؤثر برای افزایش بهره‌وری اقتصادی سامانه‌های خورشیدی به‌منظور گرم کردن سیال برای مصارف کشاورزی است (Kalogirou *et al*., 2006). ذخیره‌سازهای انرژی یکی از پرکاربردترین سامانه‌هایی هستند که برای ایجاد تعادل بین ساعات اوج بار و ساعات اوج مصرف انرژی در ادوات تأمین انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Tyagi *et al*., 2012). تکنیک‌های ذخیره‌سازی انرژی تا حد زیادی می‌توانند عدم تطابق بین عرضه انرژی و تقاضای آن در مدت زمان مصرف را مدیریت نماید (Bhardwaj *et al*., 2020). یکی از منابع مهم برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، استفاده از مواد تغییر فازدهنده است که با تغییر فاز در حین گرماگیری و گرمادهی امکان ذخیره‌سازی و آزاد سازی انرژی را افزایش می‌دهد (Ebrahimi *et al*., 2021).

سامانه‌های انرژی گرمایی شامل یک واحد ذخیره‌کننده انرژی عایق شده و مواد جامد یا مایع هستند که با تغییر حالت این مواد، تغییرات انرژی به‌صورت گرمای محسوس و گرمای نهان انجام می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در خشک‌کن های خورشیدی به‌صورت محسوس انجام گرفته است. مواد تغییرفاز-دهنده PCM[1] شامل مواد آلی یا معدنی هستند که مقدار زیادی انرژی حرارتی را به خود جذب کرده و در هنگام تغییر حالت از فاز جامد به مایع انرژی را به‌صورت نهان ذخیره کرده و هنگام تغییرفاز از حالت مایع به جامد انرژی را آزاد می‌کنند. مواد تغییرفازدهنده می‌توانند انرژی گرمایی را بدون هیچ تغییری درون خود ذخیره و یا آزاد کنند. PCM های آلی را می‌توان به گروه پارافین‌ها (ذخیره آلکان‌ها) و غیرپارافین‌ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گیلیکولیک اسیدها طبقه‌بندی کرد. در دهه‌های اخیر با توجه به ویژگی‌های ذخیره انرژی گرمایی به صورت نهان، تحقیقات مهمی به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در یک مطالعه، آزمایش‌هایی روی خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع غیرمستقیم برای ۲/۷ کیلوگرم گوجه‌فرنگی در دو حالت با و بدون مواد تغییر فازدهنده انجام شد. نتایج نشان داد با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، زمان خشک‌شدن تا ۱ ساعت و ۴۸ دقیقه پس از غروب خورشید افزایش می‌یابد و مدت زمان خشک شدن تا ۱۲ ساعت کاهش یافت. کیفیت و بافت گوجه‌فرنگی خشک شده از خشک‌کن خورشیدی دارای مواد تغییر فازدهنده در مقایسه با خشک‌کردن در معرض آفتاب

1- Phase Change Material

مناسب‌تر ارزیابی شد (Yadav & Ramana, 2020). ارزیابی استفاده از سامانه کمکی حرارتی دارای PCM برای ذخیره انرژی خورشیدی در روز برای یک خشک‌کن نشان داد بازده انرژی روزانه ذخیره‌ساز خورشیدی تا ۳۳/۹ درصد و بازده اکسرژی روزانه تا ۸/۵ درصد افزایش می‌یابد. با استفاده از سامانه ذخیره‌ساز انرژی دمای محفظه خشک‌کن در تمام شب ۴ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط و رطوبت نسبی در محفظه خشک‌کن ۳۴/۵–۱۷ درصد کمتر از رطوبت نسبی محیط مشاهده شد که این یعنی عملیات خشک شدن حتی در طول شب نیز انجام می‌گرفت (El Khadraoui *et al*., 2017). در تحقیق دیگر از مواد تغییر فازدهنده در درون سامانه ذخیره‌ساز حرارتی با جمع‌کننده لوله خلا استفاده شد. استفاده از مواد تغییر فازدهنده باعث بهبود کارایی سامانه حداقل به میزان ۲۵ درصد و کاهش مدت زمان خشک شدن ورقه‌های سیب به اندازه ۱۶/۵ درصد شد. علاوه بر آن از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[1]) برای بررسی حرکت سیال در سامانه استفاده و نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از روش CFD پیش بینی دقیق‌تری از ذخیره انرژی را نسبت به سایر مدل‌های ریاضی ارایه می‌دهد (Iranmanesh *et al*., 2020). در تحقیقی خشک کردن فلفل سبز به وسیله خشک‌کن خورشیدی با و بدون PCM مورد بررسی قرار گرفت. مواد تغییر فازدهنده درون شیارهایی بر روی صفحه جاذب قرار گرفته بودند. نتایج بررسی‌ها مشخص نمود که استفاده از PCM، زمان خشک کردن را ۲۰–۷ درصد در خشک‌کن با شرایط طبیعی و ۳۸–۳۵ درصد در خشک کردن به‌صورت همرفت اجباری در مقایسه با شرایط بدون استفاده از PCM، کاهش می‌دهد. رنگ و کیفیت فلفل سبز خشک شده در خشک کن با PCM به دلیل کاهش نوسانات شدید دمایی، بسیار مطلوب است (Babar *et al*., 2021).

سنجد یک محصول کشاورزی خوشمزه بوده و در بیشتر مناطق جهان از جمله روسیه، قزاقستان، ترکیه و ایران کشت می‌شود (Hamidpour *et al*., 2017; Akbolat *et al*., 2008). ایران با تولید بیش از ۱۰ هزار تن در سال یکی از تولید کنندگان عمده سنجد در جهان است. سنجد را می‌توان در هر دو حالت تازه و خشک استفاده نمود. علاوه بر آن می‌توان پس از آسیاب کردن به‌صورت آرد در شیر مخلوط شده و برای درمان آرتریت روماتوئید و درد مفاصل استفاده می‌شود (Rashidi *et al*., 2021). این میوه دارای انواع پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه، چربی‌ها و قندها مثل فروکتوز و دارای خواص دارویی بسیاری چون پاک‌کننده معده و روده است (Boudraa, 2020). در ایران این محصول در استان‌های آذربایجان‌شرقی، سمنان، خراسان رضوی، کرمان و کردستان کشت می‌شود. واریته‌های بومی دره‌وار، شاهرودی، حاج حسین، مملی و قزل از مهمترین واریته‌های کشت شده در این استان‌ها می‌باشد. محتوای رطوبت سنجد به محض برداشت از درخت از ۶۰– ۲۰ درصد بسته به تنوع آن متغیر است و بایستی پس از برداشت عملیات خشک کردن بر روی محصول صورت پذیرد. امروزه به‌دلیل خواص دارویی شناخته شده، بخشی زیادی به‌صورت پودر شده به فروش رسیده و مورد مصرف قرار می‌گیرد. بنابراین برای آسیاب نمودن این میوه بایستی رطوبت تمام اجزای آن (پوست، آرد و هسته) به کمتر از ۱۰ درصد برسد (Sahan *et al*., 2015).

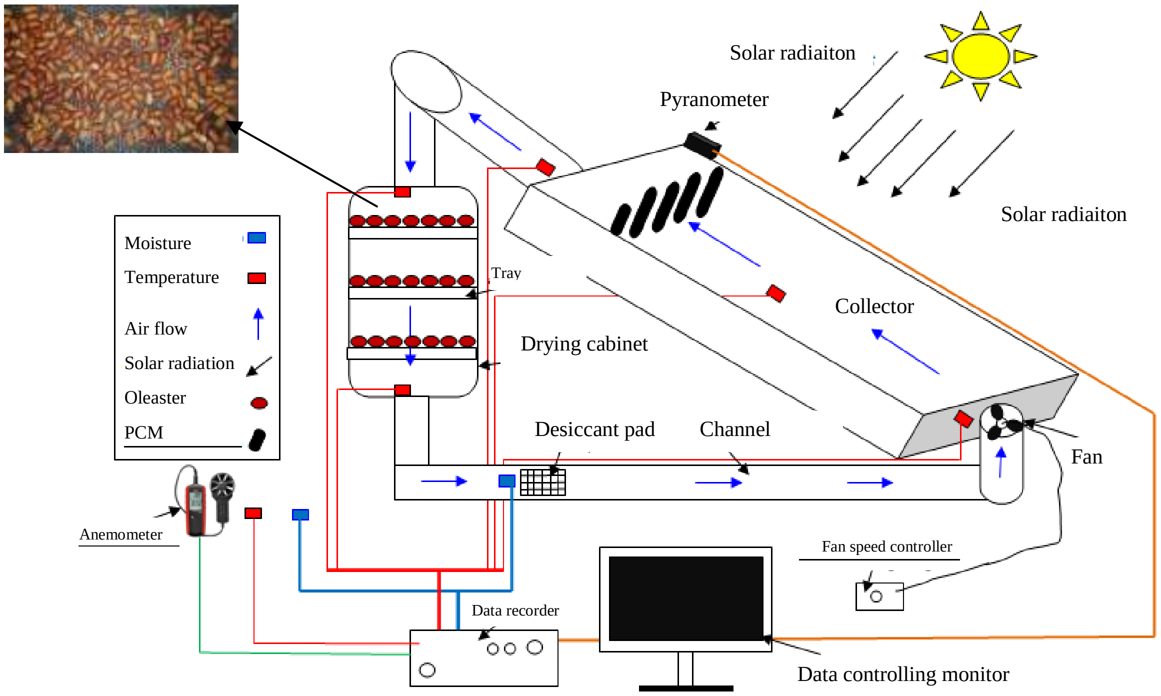
با توجه به اینکه در ساعاتی از روز، دمای داخل جمع‌کننده بیش از حد افزایش می‌یابد و انباشت حرارتی درون جمع‌کننده‌های خورشیدی مانند صفحه تخت صورت می‌گیرد، تلفات حرارتی به‌طور محسوسی افزایش پیدا کرده و در نتیجه بازده حرارتی کاهش می‌یابد. استفاده از ذخیره‌ساز حرارتی، گرمای اضافی در جمع‌کننده در حین گرماگیری را جذب کرده و از اتلاف گرما (در اثر همرفت به محیط از طریق بدنه‌ی جمع‌کننده و شیشه) جلوگیری می‌کند. آرایش قرارگیری و ابعاد PCM در درون جمع‌کننده خورشیدی به‌صورت مستقیم بر بازده حرارتی جمع کننده خورشیدی تأثیر دارد. با توجه به مطالعات پیشین، مشاهده گردیده است که لوله‌های حاوی پارافین بیشتر به‌صورت لایه‌هایی بر روی کف جمع‌کننده قرار داده شده‌اند که این امر باعث می‌گردد بخشی از انرژی ذخیره شده در هنگام آزادسازی از صفحات پشتی جمع‌کننده تلف شود. علاوه بر آن در این نوع خشک‌کن‌ها از سامانه جریان بازگشتی استفاده نمی‌شد که این امر باعث اتلاف بخش اعظمی از انرژی حرارتی از سامانه می‌شد. در این مطالعه مواد تغییر فازدهنده به‌صورت عمودی در ردیف‌های پشت سر هم و در فواصل مختلف در داخل صفحه‌ی جمع-کننده قرار گرفتند. همچنین روند خشک شدن سنجد و کیفیت آن با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

شرح دستگاه خشک‌کن خورشیدی و متعلقات آن

خشک‌کن خورشیدی غیر مستقیم به‌طور کلی شامل شاسی دستگاه، جمع‌کننده صفحه تخت، فن الکتریکی، کابینت خشک‌کن، لوله‌های حاوی PCM و حسگرها می‌باشد. اجزای اصلی سامانه خشک‌کن خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.

1- Computational Fluid Dynamics



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن خورشیدی استفاده شده

Fig. 1. Schematic of used solar dryer

اجزای مختلف سامانه خشک‌کن همراه با متعلقات و جزئیات (ویژگی‌ها و ابعاد) در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- جزئیات سامانه جمع‌کننده و خشک‌کن خورشیدی

Table 1- Details of the solar collector and dryer system

اجزا Components	جزئیات و ابعاد Details and dimensions
صفه جاذب Absorber plate	ورق گالوانیزه عایق شده با فوم، پوشیده شده با رنگ سیاه مات، با ابعاد ۹۰۰ در ۱۸۰۰ میلی‌متر، و ضخامت ۱ میلی‌متر، زاویه شیب ۴۵ درجه، راستای قرارگیری شمال- جنوب به سمت جنوب Galvanized sheet insulated with foam, covered with matte black color, with dimensions of 900 x 1800 mm, and thickness of 1 mm, inclination angle of 45 degrees, north-south to south direction
پوشش Transparent	شیشه معمولی تک لایه با ضخامت ۴ میلی‌متر، فاصله بین پوشش و سطح صفحه جاذب ۱۸۰ میلی‌متر، با ضرایب عبور، جذب و انعکاس به‌ترتیب ۰/۸۹، ۰/۰۶ و ۰/۰۸. Single-layer glass with a thickness of 4 mm, the distance between the cover and the surface of absorber plate is 180 mm, with transmission, absorption and reflection coefficients of 0.89, 0.06 and 0.08, respectively.
جریان دهنده هوا Air circulator	یک فن محوری ۲۲۰ ولت با توان ۶۰ وات (Damandeh, Iran, 2153) A 220V, 60W axial fan (Damandeh, Iran, 2153)
کابینت خشک‌کن Drying cabinet	تخته فیبر (MDF) با ضخامت ۱۰ میلی‌متر با ابعاد ۳۰۰× ۴۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر Fiberboard (MDF) with thickness of 10 mm, dimensions of 300-400 mm and a height of 600 mm.
سینی Tray	جنس فلزی با حفره‌های دایروی به ابعاد ۳۰۰× ۴۰۰ میلی‌متر Metal sheet with circular holes of 300-400 mm
ماده تغییرفازدهنده Phase change material	لوله‌های مسی به قطر ۲۰ میلی‌متر به ضخامت ۱ میلی‌متر، به تعداد ۲۵ عدد، در ۵ ردیف، با فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر روی ردیف، پر شده با پارافین مدل RT50 Copper tubes with a diameter of 20 mm and a thickness of 1 mm, 25 pieces, in 5 rows, with 5, 10 a۹۸۷۳۵۶۲,۰۱/⁎n ۳۱d 15 cm intervals on the row, filled with RT50 paraffin
سامانه جریان بازگشتی Air Recirculation system	لوله گالوانیزه به قطر ۱۵۰ میلی‌متر، خروجی از انتهای کابینت و ورودی به جمع کننده، با قابلیت کنترل دبی هوا، عایق‌بندی شده با فوم به ضخامت ۳ میلی‌متر Galvanized pipe with a diameter of 150 mm, outlet from the end of the cabinet and inlet to the collector, with the ability to control the air flow, insulated with 3 mm thick foam.



الف) فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر
a) Distance 5cm

ب) فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر
b) Distance 10cm

ج) فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متر
c) Distance 15cm

شکل ۲- نحوه قرارگیری لوله‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت عمود به صفحه جاذب

Fig. 2. The place of tubes containing phase change materials perpendicular to the absorber plate

مهم‌ترین بخش هر خشک‌کن خورشیدی، جمع‌کننده است که کار اصلی آن، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انتقال آن به سیال عامل است. جمع‌کننده صفحه تخت مورد نظر شامل: صفحه جاذب که برای جذب حداکثری و انتشار حداقل انرژی خورشیدی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. یک پوشش شیشه‌ای تک لایه بر روی صفحه جاذب برای عبور پرتوهای‌های خورشید قرار گرفته است. بر روی صفحه جمع‌کننده تعداد ۲۵ لوله‌ی مسی با فواصل معین حاوی PCM قرار داده شده است. نحوه قرارگیری لوله‌های حاوی PCM در شکل ۲ نشان داده شده است.

کابینت عایق‌بندی شده دارای سه سینی است، که برای سهولت جابجایی سامانه بر روی نبشی آهن که بر روی شاسی دستگاه جوش زده شد، قرار گرفت. در ورودی جمع‌کننده یک فن الکتریکی ۲۲۰ ولت ۶۰ وات قرار می‌گیرد. با شروع به کار فن الکتریکی، هوا درون سامانه جریان پیدا می‌کند. با عبور پرتوهای خورشیدی از شیشه، صفحه‌ی جاذب تشعشع را تبدیل به انرژی گرمایی نموده و هوای جریان‌یافته درون سامانه انرژی حرارتی را به درون کابینت انتقال می‌دهد. هوای گرم پس از انرژی‌دهی به کابینت خشک‌کن و خروج از آن با استفاده از لوله‌های فلزی عایق‌بندی شده دوباره به ورودی جمع‌کننده باز می‌گردد. در اثر بازگشت هوای خروجی از کابینت به درون سامانه، بخشی زیادی از انرژی حرارتی تولید شده، وارد سیکل خشک کردن محصول می‌گردد.

ماده تغییر فازدهنده: ماده تغییر فازدهنده از جنس پارافین RT50 درون لوله‌های مسی با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۱۷ سانتی‌متر قرار گرفت. داخل هر لوله پس از ذوب شدن به میزان ۲±۳۰ میلی‌لیتر پارافین قرار گرفت و برای جلوگیری از نشتی پارافین داخل لوله، دو طرف لوله‌ها با جوش مسی مسدود شد. لوله‌های حاوی ماده PCM برای جذب سریعتر انرژی گرمایی، رنگ لوله‌های مسی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. لوله‌های مسی توسط پروفیل‌های گالوانیزه، در پنج ردیف به‌صورتی‌که لوله‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی نداشته باشند، قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی مربوط به پارافین RT50 در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- خواص پارافین واکس مورد استفاده به‌عنوان PCM داخل جمع‌کننده

Table 2- Properties of paraffin wax used as PCM inside the collector

Property ویژگی	Liquid temperature (K) دمای حالت مایع	Density ($kg.m^{-3}$) چگالی	volumetric expansion Coefficient($1.K^{-1}$) ضریب انبساط حجمی	Latant heat ($kJ.kg^{-1}$) گرمای نهان	Thermal conductivity ($W.m^{-1} K^{-1}$) هدایت حرارتی	Specific heat ($kJ.kg^{-1} K^{-1}$) گرمای ویژه	Solid temperature (K) دمای حالت جامد
Value	325	783	0.000561	166	0.2	2.1	317.3

خشک کردن سنجد

همان‌طور که اشاره شد برای ارزیابی تأثیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده بر روند خشک کردن محصول از سنجد (*Elaeagnus angustifolia*) استفاده گردید. در این مطالعه سنجدها به میزان کافی از بازار خشکبار شهر تبریز خریداری شده و با نگهداری در پلاستیک، بدون هیچ‌گونه پیش‌تیماری آماده‌ی خشک‌شدن شدند. رطوبت اولیه محصول طبق استاندارد AOAC در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به‌مدت ۵ ساعت به میزان ۱/۱۵ ± ۶۲/۴۶ درصد تعیین گردید (Dorouzi *et al.*, 2018).

طرح آزمایش خشک‌کردن

فرآیند خشک‌کردن سنجد در دستگاه خشک‌کن خورشیدی به‌مدت ۹ روز متوالی در مرداد ماه سال ۱۴۰۱ صورت پذیرفت. روند خشک شدن محصول در سه حالت قرارگیری لوله‌های PCM به فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر با سرعت جریان هوا در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه صورت پذیرفت. دستگاه در فضای باز و به سمت جنوب قرار گرفت و سپس از ساعت ۸:۰۰ داده‌برداری شروع شد. یک ساعت قبل از داده‌برداری برای گرم شدن اجزای مختلف سامانه، دستگاه در مقابل خورشید قرار می‌گرفت. به‌منظور خشک شدن، محصول سنجد مورد نظر در سینی‌های داخل کابینت قرار داده شد. یک توری کوچک برای کنترل وزن در ساعات مشخص در نظر گرفته شد. برای دقت در داده برداری، وزن نمونه‌ها، در ساعت اولیه داده‌برداری به‌صورت یک ربع یکبار و در بقیه ساعات به‌صورت نیم ساعت یکبار تا ساعت ۲۰:۰۰ انجام گرفت. لازم به ذکر است در حین توزین، دمای نقاط مختلف سامانه، میزان شدت تابش خورشیدی، میزان وزش باد، رطوبت محیط و دمای محیط نیز اندازه‌گیری می‌شد.

ابزارهای اندازه‌گیری و حسگرها

در این پژوهش برای کنترل و سنجش دمای نقاط مختلف از حس گر دمای DS18B20 استفاده شد که یک حس‌گر دیجیتال است، استفاده گردیده است. مزیت این حس‌گر نسبت به حس‌گر دمای آنالوگ LM35 این است که خروجی حس‌گر DS18B20 دیجیتال و به‌صورت مدولاسیون عرض پالس است و نیازی به مبدل آنالوگ به دیجیتال ندارد و می‌توان مستقیما آن را به میکروکنترلر وصل نمود. به این منظور دو حسگر درون جمع‌کننده (ورودی و خروجی) و دو حسگر دیگر درون کابینت (ورودی و خروجی) قرار داده شد. حسگر دیگری نیز برای سنجش دمای محیط در نظر گرفته شد. این حسگرها برای نشان دادن دما به بورد اندروید (Arduino Uno, Mega-32) متصل شدند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از بادسنج (UNI-T-363, China) با دقت ۰/۱ m/s کنترل شد. برای سنجش رطوبت محیط از رطوبت‌سنج (HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۱٪ استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از پیرانومتر دیجیتالی (TES 1333R, CMP6, Taiwan) با دقت ۱m/s استفاده شد. در طی ۹ روز آزمایش، محصول با وزن تقریبا یکسان در ظرفی درون سینی کابینت قرار گرفت و قبل و بعد از هر آزمایش به‌وسیله ترازوی دیجیتال AND مدل FX-3000GD به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن آن یادداشت شد.

محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع‌کننده با سامانه ذخیره‌ساز انرژی

نرخ انرژی جذب شده مفید (Q_u) توسط جمع‌کننده صفحه تخت به صورت رابطه ۱بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \qquad (۱)$$

بخش عمده انرژی خورشیدی دریافتی، از کلکتور تلف شده و انرژی باقیمانده به‌صورت انرژی گرمایی مفید می‌تواند با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شود: ($\tau\alpha$) فاکتور جذب انرژی خورشیدی است)

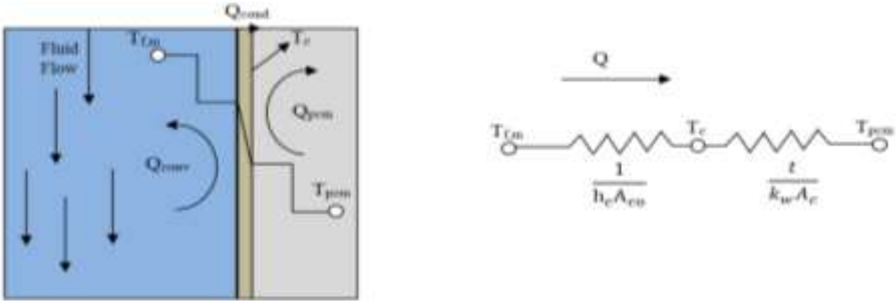
$$\dot{Q}_u = A_c F_R \left(\left[I_o (\tau\alpha) \right] - U_L (T_i - T_o) \right) \qquad (۲)$$

بازده گرمایی مطابق با ASHRAE standard 2003 با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید (Eltawil *et al.*, 2018):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_C I_o} = \frac{\dot{m} c_p (T_{oi} - T)}{A_C I_o} \qquad (۳)$$

سیستم ذخیره‌سازی شامل لوله مسی، در پنج ردیف بر روی سطح صفحه جاذب قرار گرفته است. لوله با موم پارافین پر شد. در جریان ذخیره‌سازی انرژی (شارژ)، زمانی‌که شدت تابش در سطح بالایی قرار دارد، سیال گرم شده و پارافین به حالت جامد در داخل لوله مارپیچ از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی‌که شدت تابش خورشیدی در سطح پائینی است، دمای سیال داخل کلکتور کمتر از دمای محیط است. بنابراین تغییر فاز بالعکس شده و پارافین انرژی گرمایی را به هوای جریان یافته در در داخل کلکتور و محفظه خشک‌کن منتقل می‌نماید.

انرژی جذب شده توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله‌های مسی به‌عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع کننده صفحه تخت، شامل سیال، دیواره و PCM که به‌عنوان سیستم ذخیره سازی به کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی کلکتور می‌باشد. شکل ۳ انرژی گرمایی جذب شده، که از هوا به دیواره مسی، از طریق همرفت منتقل شده است و سپس از دیواره به پارافین هدایت شده است، را نشان می‌دهد (Esakkimuthu *et al.*, 2013). بنابراین، دمای پارافین (PCM) افزایش می‌یابد و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳- مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به‌عنوان ماده PCM
Fig. 3. Heat transfer circuit for fluid, copper tube and paraffin as PCM material

میزان انرژی گرمایی منتقل شده از کلکتور به سیال، می‌تواند با در نظر گرفتن دمای ورودی ($T_{f.in}$) و خروجی ($T_{f.out}$) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شود (Serale *et al.*, 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (۴)$$

شار گرمایی همرفتی از سیال با دمای بالاتر به پوشش دیواره PCM (Q_{conv}) به میانگین دمای سیال ($T_{f,m}$) و دمای پوشش ($T_{c,m}$) بستگی دارد:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m}) \quad (۵)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پرانتل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در صفحه کلکتور لازم و ضروری هستند.

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه ۶ قابل محاسبه است (Koca *et al.*, 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (۶)$$

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره‌سازی و تخلیه رخ می‌دهد، انرژی مبادله‌پذیر کل به‌صورت معادله ۷ تعریف می‌شود (Goyal *et al.*, 1998).

$$\begin{aligned} &Q_{pcm} = m_{pcm} C_s (T_{pcm} - T_{melt}) Q_{pcm} = m_{pcm} C_s (T_{pcm} - T_{melt}) && T_{pcm} < T_{melt} \\ &Q_{pcm} = 0 && T_{pcm} = T_{melt} \\ &Q_{pcm} = m_{pcm} C_l (T_{pcm} - T_{melt}) && T_{pcm} > T_{melt} \end{aligned} \quad (۷)$$

بازدهی خشک کردن و انرژی مصرفی ویژه

بازدهی خشک کردن باید جهت ارزیابی تأثیر PCM در شرایط مختلف بر فرآیند خشک کردن نمونه‌ها تعیین گردد. به همین دلیل، نمونه‌های سنجد به‌صورت تک لایه روی سینی‌ها در داخل محفظه قرار گرفت. یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ g (ظرفیت ۱۵۰۰ g) جهت اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها، هر ۱۵ دقیقه یکبار در ساعت اول و سپس هر ۳۰ دقیقه یک‌بار، توزین گردید. نسبت رطوبت نمونه‌ها براساس رابطه ۸ محاسبه شد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (۸)$$

نرخ خشک کردن در جریان خشک کردن با استفاده از رابطه ۹ در هر لحظه قابل محاسبه است (Reyes *et al.*, 2014).

$$DR = \frac{dM}{dt} = -k (M_t - M_e) \quad (۹)$$

سینتیک خشک کردن سنجد، پنج مدل ریاضی با در نظر گرفتن زمان خشک شدن و ثابت‌های مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. این مدل‌ها همراه با جزئیات مربوطه در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. برای برازش و تحلیل رگرسیون چندگانه از زیر برنامه برازش منحنی در نرم افزار متلب (نسخه ۲۰۱۸) استفاده شد. مدل انتخابی براساس میزان برازش (بیشترین میزان R^2 و کمترین میزان RMSE) بر داده‌های تجربی انتخاب می‌گردد.

انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن با $Q_{in,dryer}$ و با استفاده از رابطه ۱۰ بیان می شود (Iranmanesh *et al.*, 2020):

$$Q_{in,dryer} = 10^{-6}[(\int_0^t in(t) \times c_p (T_{in,coll} - T_{out,coll}) dt - \int_0^t in(t)) \times c_p (T_{in,s} - T_{out,s}) dt)] \quad (۱۰)$$

انرژی خروجی از خشک‌کن ($Q_{o,dryer}$) با رابطه ۱۱ محاسبه می شود.

$$Q_{o,dryer} = 10^{-3} \times w \times L_v \quad (۱۱)$$

W و Lv با استفاده از معادلات ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$W = \frac{W_\alpha (M_o - M_f)}{100 - M_f} \quad (۱۲)$$

$$L_v = 2502.54 - 2.309 T_{ca} \quad (۱۳)$$

گردش جریان هوا از طریق کلکتور و خشک‌کن جهت تسریع فرآیند خشک کردن، لازم و ضروری است. بنابراین، انرژی مورد استفاده توسط فن، می‌تواند با معادله ۱۴ محاسبه شود.

$$E_{mec} = 10^{-6} \times P_{fan} \times t \quad (۱۴)$$

جدول ۳- جزئیات مدل‌های ریاضی اعمال شده برای توصیف سینتیک خشک کردن سنجد

Table 3- Details of mathematical models applied to describe the drying kinetics of oleaster

Row ردیف	Model Name نام مدل	Mathematical equation رابطه ریاضی	Reference منبع
1	*Page*	$MR = \exp(-kt^n)$	*Agrawal and Singh* (1978)
2	*Henderson and pabis*	$MR = a\ exp(-kt)$	*Westerman et al.* (1973)
3	*Logarithmic*	$MR = a\exp(-kt) + b$	*Yagcioglu et al.* (1999)
4	*Midilli et al*	$MR = a\exp(-\mathrm{kt}^{\mathrm{n}}) + bt$	*Henderson* (1974)
5	*Wang and Singh*	$MR = 1 + at + bt^2$	*Wang and Singh* (1978)

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن خشک‌کن و محصول و استخراج آب از سنجد و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به خشک‌کن، برای تعیین بازدهی خشک کردن، رابطه ۱۵ لحاظ می‌گردد (Yaseen & Al-Kayiem, 2016).

$$\eta_{dryer} = \frac{Q_{out,dryer}}{Q_{in,dryer} + E_{mec}} \quad (۱۵)$$

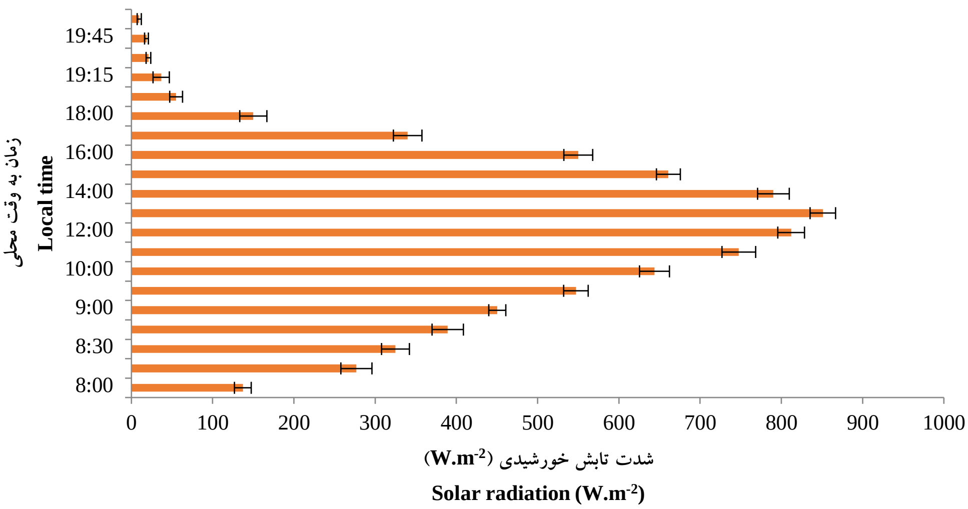
عملکرد خشک‌کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) محاسبه می‌گردد. SCE به‌صورت انرژی لازم برای خشک کردن یک کیلوگرم از محصول تعریف می‌شود که به‌صورت ذیل در رابطه ۱۶ نشان داده شده است.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (۱۶)$$

نتایج و بحث

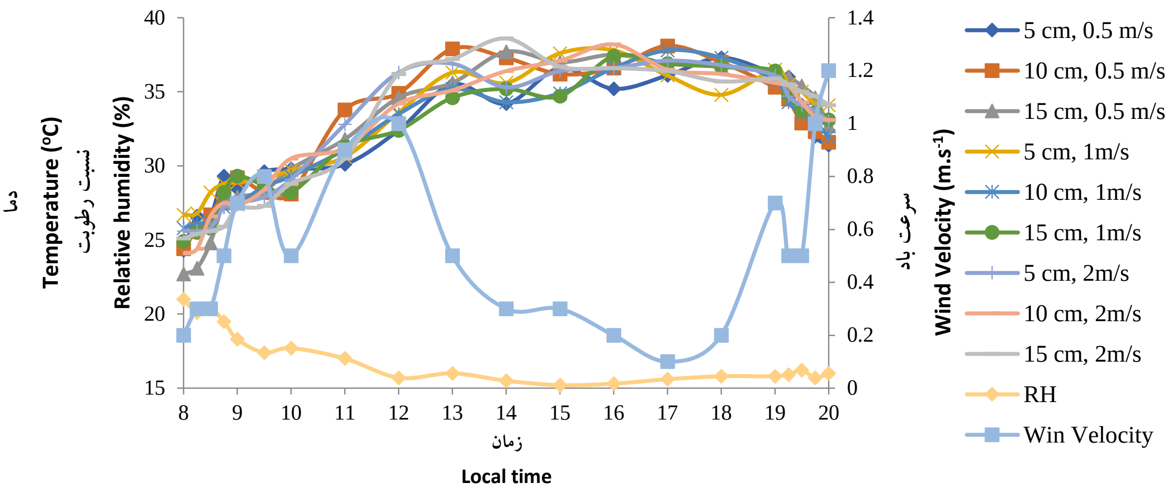
داده‌های محیطی

در شکل ۴ میانگین شدت تابش خورشیدی تابیده شده به جمع کننده خورشیدی نشان داده شده است. متوسط تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۸:۰۰ افزایش یافته و در ساعت ۱۳:۰۰ تا ۱۴:۰۰ (حدود ۱۵ ± ۸۵۱ وات بر متر مربع) به حداکثر می‌رسد. سپس به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در ساعت ۲۰:۰۰ به حداقل (حدود ۲ ± ۱۵ وات بر متر مربع) می‌رسد. نمودار نشان می‌دهد که زمان مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی در ساعاتی که شدت تابش خورشیدی بیشینه است. لازم به ذکر است در تمام روزهای آزمایش شرایط محیطی مناسب و آسمان صاف بود.



شکل ٤- تغییرات میانگین شدت خورشیدی در طول روزهای آزمایش

Fig. 5. The variations of average solar intensity changes during the test days



شکل ۵- تغییرات دما، رطوبت هوا و سرعت باد محیط در طول روزهای آزمایش

Fig. 5. Variation in temperature, air humidity and ambient wind speed during the test days

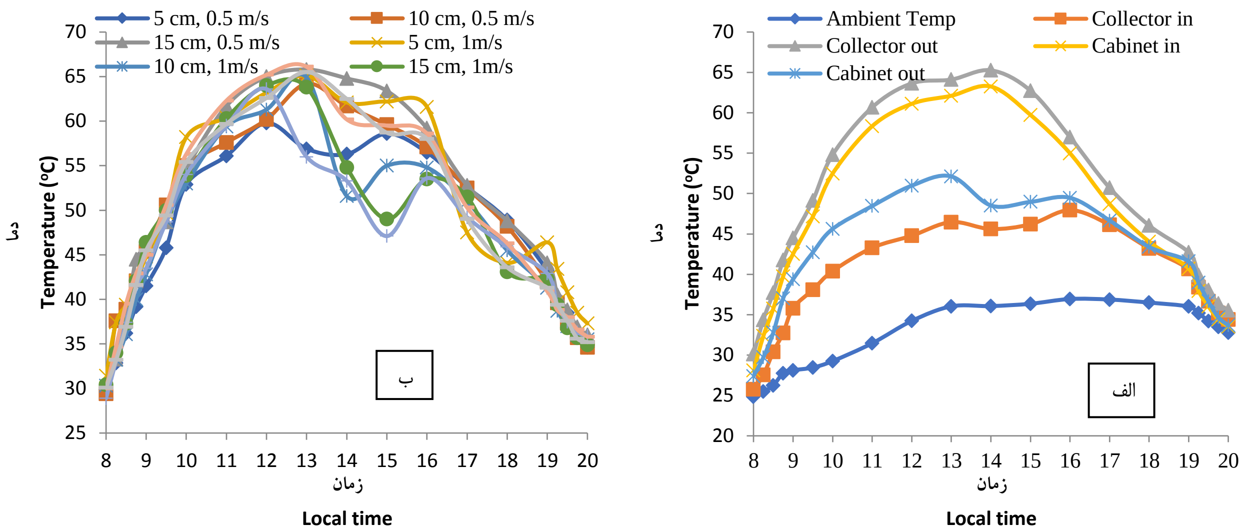
میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی هوا در طول روزهای آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت تابش خورشید افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی به زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا اتفاق می‌افتد که باعث افزایش دمای محیط می‌گردد (Rashidi *et al.*, 2018). اما با افزایش تابش خورشید، در اثر تبخیر مولکول‌های آب (بین مولکول‌های هوا) رطوبت نسبی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۵ مشخص است، دمای هوای محیط به‌طور میانگین از ۱/۱۵ ± ۲۵/۶ از صبح افزایش یافته و در ساعات بین ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ به بیشینه مقدار ۱/۵ ± ۳۶/۳ درجه سلسیوس رسیده و سپس کاهش می‌یابد. همزمان رطوبت هوای محیط با افزایش دما نیز از اوایل صبح از ۲۲/۴ درصد کاهش یافته و در اواسط روز به ۱۵/۲ درصد می رسد. رطوبت هوا با نزدیک شدن به ساعت ۲۰ افزایشی است. علاوه‌بر آن میانگین سرعت باد نیز در روزهای داده‌برداری در شکل ۵ گزارش شده است. سرعت وزش باد در طول روز بین ۰/۳ تا ۱/۲ متر بر ثانیه تغییر می‌کرد.

دمای هوای ورودی به کابینت خشک‌کن

تغییرات مربوط به دماهای ورودی و خروجی جمع‌کننده و ورودی و خروجی کابینت خشک‌کن نسبت به زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که از صبح با افزایش دمای محیط و افزایش شدت تابش خورشیدی تمام دماها افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دما برای خروجی جمع‌کننده در ساعت ۱۴:۰۰ اتفاق می‌افتد و مقدار آن ۶۵/۲ درجه سلسیوس بود. در این هنگام دمای ورودی به جمع‌کننده، ورودی و خروجی کابینت به‌ترتیب ۴۵/۶، ۶۳/۲ و ۴۸/۵ درجه سلسیوس بود. این بدان معناست که دمای ورودی و خروجی جمع‌کننده و ورودی و خروجی کابینت خشک‌کن به‌ترتیب ۱۰/۵، ۲۹/۲، ۲۷/۲، ۱۲/۵ درجه سلسیوس نسبت به دمای محیط بالاتر بود.

در اثر عدم وجود سامانه جریان بازگشتی هوای ورودی حداقل ۱۰/۵ درجه سلسیوس کمتر از حالت با جریان بازگشتی خواهد بود. دمای خروجی از جمع‌کننده به‌دلیل وجود ماده تغییر فازدهنده در ساعات ابتدایی پایین‌تر از حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده خواهد بود. این به‌دلیل جذب قسمتی از انرژی تابیده شده به جمع‌کننده است. پس از ساعت ۱۷:۰۰ با کاهش شدت تابش خورشیدی، ماده تغییر فازدهنده انرژی ذخیره شده در خود را از دست داده و باعث افزایش دما به‌صورت محسوس (۴/۳- ۲/۵ درجه سلسیوس) می‌گردد. این فرآیند برای حالت‌های مختلف در شکل ۶ ب مشخص است. در تحقیقی مشابه دمای هوا در خشک‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی، بازتابنده‌ها و هوای بازیافتی حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای محیط در تابستان افزایش یافت (Amer *et al.*, 2018).



شکل ٦- (الف) متوسط تغییرات دمای قسمت‌های مختلف سامانه خشک‌کن خورشیدی نسبت به زمان محلی، (ب) تغییرات دمای هوای خروجی از جمع کننده نسبت به زمان محلی در شرایط مختلف

Fig. 6. (a) Average temperature changes of different parts of the solar dryer system relative to local time, (b) temperature changes of the air coming out of the collector against local time at different conditions

بازده حرارتی جمع‌کننده

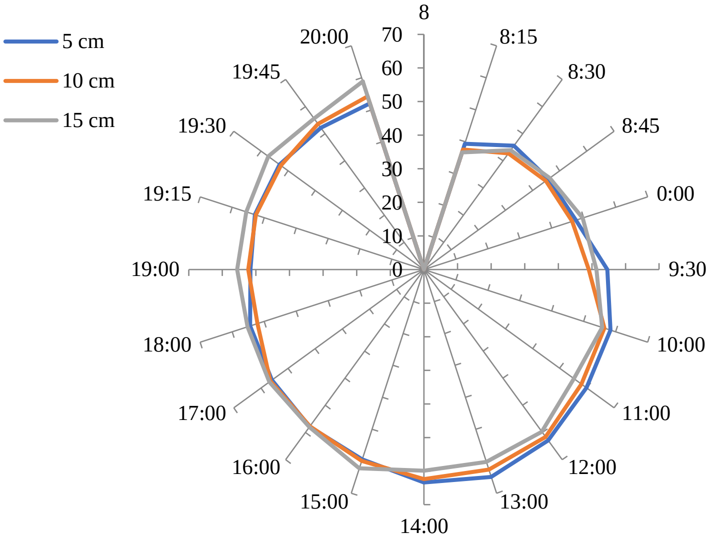
تغییرات بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت در فواصل مختلف از مواد تغییر فازدهنده نسبت به زمان به وقت محلی در شکل ۷ نشان داده شده است. بازده حرارتی با افزایش تابش خورشیدی (از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۴:۰۰) افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد. به این علت که بخشی از انرژی برای گرم شدن اجزای سامانه و بخشی دیگر از طرق دیواره‌ها تلف می‌شود. به دلیل تلفات کسینوس (Cosine loss) تابش خورشیدی، بازده حرارتی در مواقع صبح (۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰) و عصر (۱۶:۰۰ تا ۱۸:۰۰) کمتر است (Wang *et al.*, 2016). برای جبران این کاهش و بهبود راندمان حرارتی استفاده از مکانیزم ردیاب بسیار مؤثر بوده و باعث کاهش تلفات کسینوسی تابش خورشیدی خواهد شد (Kalogirou *et al.*, 2006). راندمان حرارتی برای تمام حالت‌ها با ماده تغییر فازدهنده قبل از ساعت ۱۴:۰۰، کمتر از حالتی است که از این ماده استفاده شده است. در این حالت بخشی از گرما در پارافین جذب می‌شود. بازده حرارتی برای فاصله 5cm در هنگام انرژی گیری بیشتر از فواصل دیگر است. به‌دلیل عدم در معرض قرار گرفتن PCM در مقابل هوا، انرژی حرارتی با افت کمتری از جمع‌کننده خارج می‌شود. با کاهش شدت تابش خورشیدی، انرژی جذب شده در ماده تغییر فازدهنده به هوای جریان‌یافته در جمع‌کننده رها شده، و سپس به درون خشک‌کن هدایت می‌شود. به‌دلیل پراکندگی لوله‌ها درون جمع-کننده برای فاصله ۱۵ cm، از ساعت ۱۷:۰۰ که آزادسازی انرژی آغاز می‌شود، بازده حرارتی نسبت به بقیه فواصل بیشتر است. این امر به‌دلیل ذخیره‌سازی متعادل انرژی و آزادسازی آن است.

متوسط راندمان حرارتی برای فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۵۳/۲۶، ۵۴/۸۹ و ۵۶/۲۹٪ بود. علاوه‌بر آن اضافه نمودن سامانه جریان بازگشتی باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان حداقل ۱۱/۶۵٪ نسبت به حالت بدون جریان بازگشتی شد. به‌عبارت دیگر استفاده از ماده تغییر فازدهنده و سامانه جریان بازگشتی به‌صورت همزمان باعث بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت به میزان حداقل ۱۹/۱۲ درصد برای سرعت هوای ۲ $m.s^{-1}$ بود. نتایج به‌دست آمده با یافته‌های سایر پژوهش‌ها که از ماده تغییر فازدهنده و سامانه جریان بازگشتی استفاده نمودند، مطابقت داشت (Barghi *et al.*, 2022; Rashidi *et al.*, 2021; Raj *et al.*, 2019).

روند خشک شدن محصول

انتخاب مدل ریاضی مناسب

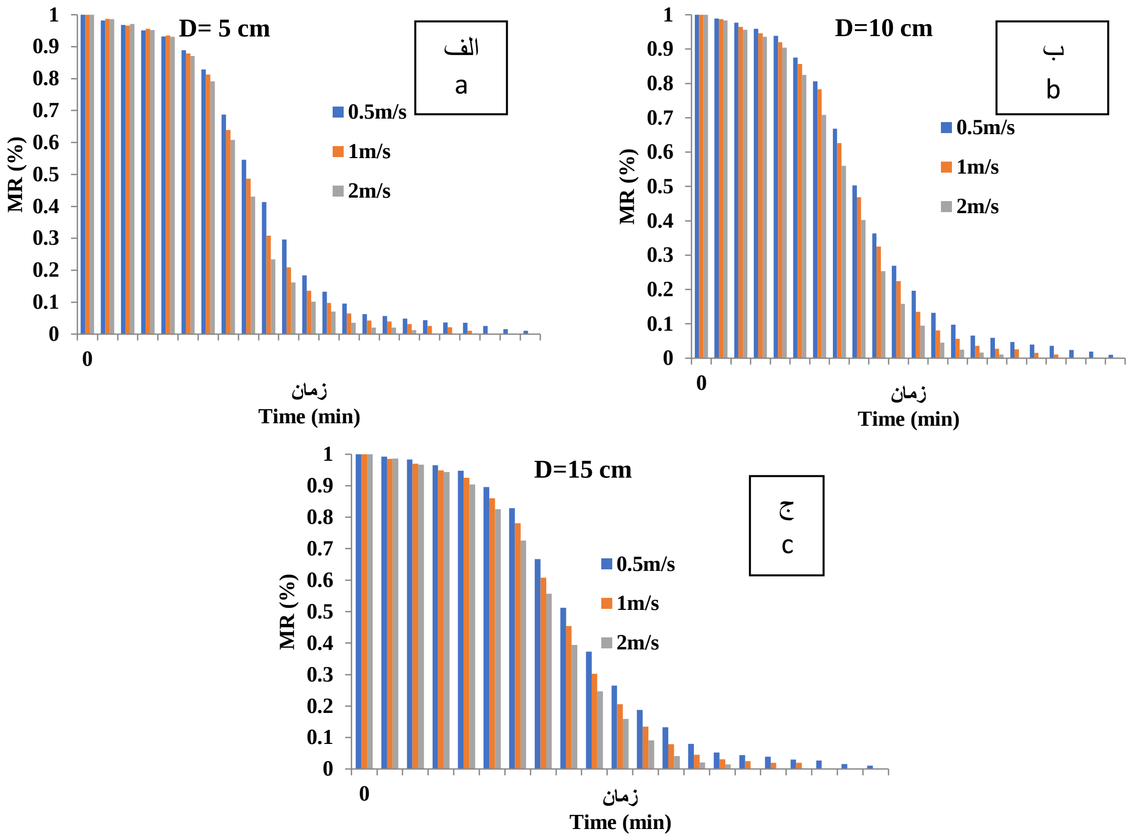
تغییرات MR در مقابل زمان خشک شدن سنجد در حالت‌های مختلف برای سرعت هوای جریان‌یافته در سامانه با موقعیت‌های مختلف از مواد تغییر فاز دهنده درون جمع‌کننده صفحه تخت در شکل ۸ نشان داده است. با توجه به شکل مشخص است که وجود مواد تغییر فاز دهنده در محفظه خشک‌کن کابینتی اثر معنی‌داری در استخراج رطوبت از محصول سنجد دارد ($P<0.05$) و این بدان معناست که بخش زیادی از انرژی ورودی به جمع‌کننده به‌وسیله PCM بازیافت می‌شود. بنابراین عملکرد خشک‌کن به‌دلیل افزایش قابل توجه مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز برای افزایش دمای نمونه‌ها برای استخراج رطوبت، بهبود می‌یابد (Aghbashlo *et al.*, 2008).



شکل ۷- تغییرات بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت در فواصل مختلف از مواد تغییر فازدهنده
Fig. 7. Variations of thermal efficiency of flat plate collector at different distances of PCM

اثر مورد ذکر شده زمانی بیشتر می‌شود که شدت تابش افزایش یابد. علاوه بر این، شکل ۸ نشان می‌دهد که سرعت خشک شدن سنجد در شروع دوره خشک شدن به‌دلیل دمای هوا پایین است. شیب منحنی خشک شدن برای نسبت رطوبت به مرور زمان افزایش می‌یابد و در نهایت به‌دلیل کاهش رطوبت، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا درون سامانه زمان خشک شدن محصول کاهش می‌یابد. اثر سرعت جریان هوا بر کاهش مدت زمان خشک شدن نسبت به تغییر جایگاه قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده بیشتر است. با اعمال جریان هوای بازگشتی زمان خشک شدن نسبت به حالتی‌که از سامانه جریان بازگشتی استفاده نمی‌شود به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (Motahayyer *et al.*, 2019). زمان خشک شدن محصول توسط خشک‌کن با تغییر موقعیت ماده تغییر فاز دهنده از 5 cm تا 15 cm به طور متوسط از ۲/۰۹ تا ۴/۱۶ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین لوله‌ها از به‌دلیل توزیع همگن مواد تغییر فاز دهنده درون محفظه جمع کننده، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در مواقعی که شدت تابش خورشیدی بالا است، بیشتر صورت گرفته و به تبع آن انرژی حرارتی بیشتری وارد خشک‌کن شده و روند خشک شدن سریع تر صورت می گیرد. از طرف دیگر با افزایش سرعت هوا از ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه مدت زمان خشک شدن از ۸/۳۲ تا ۱۶/۶۴ درصد کاهش یافت. برای خشک-کن کابینتی خورشیدی با پارامترهای مشابه بدون فرآیند بازگشت حرارت، مدت زمان خشک شدن ورقه‌های سیب با مواد تغییر فاز دهنده حداقل ۷/۱۴ ٪ کاهش یافت (Iranmanesh *et al.*, 2020). در بررسی خشک‌کردن گوجه‌فرنگی، استفاده از مکانیزم متخلخل و گردش مجدد، زمان خشک شدن را حداقل ۶/۱۱ درصد تسریع کرد (Motahayyer *et al.*, 2019). نتایج خشک‌کردن گیاه دارویی (*Valerina jatamansi*) نشان می‌دهد که اعمال سامانه ذخیره‌سازی حرارتی در خشک‌کن، زمان خشک‌کردن نمونه‌ها را حدود ۳/۵ ٪ کاهش داد (Bhardwaj *et al.*, 2020). علاوه بر این، سایر مطالعات نشان دادند که شیب منحنی‌های نسبت رطوبت به‌دلیل کاهش آب آزاد در نمونه‌ها به مرور زمان کاهش می‌یابد (Atalay, 2020; Antal *et al.*, 2016).

برای توصیف و تعریف فرآیند رطوبت‌زدایی محصولات کشاورزی، مدل‌های ریاضی روش مناسبی است. بنابراین تحلیل رگرسیون چندگانه با ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار متلب (Matlab, V.2019) انجام شد. در جدول ۴ مقادیر ثابت معادله ریاضی انتخاب شده ریاضی با پارامترهای آماری شامل R^2 و RMSE فهرست شده است. با توجه به حداکثر مقادیر R^2 (به‌عنوان همبستگی) و حداقل مقدار RMSE (به عنوان ریشه میانگین مربعات خطاها) بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن فرآیند خشک کردن میوه سنجد انتخاب شد. جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل ریاضی هندرسون و پابیس مدل مناسب با داده‌های تجربی مطابقت دارد. علاوه بر این، با توجه به پارامترهای مدل‌های خشک کردن، می‌توان مشاهده کرد که ثابت‌ها با افزایش فاصله بین لوله‌های تغییر فازدهنده و سرعت جریان هوا، افزایش می‌یابند (Toğrul & Pehlivan, 2002; Rashidi *et al.*, 2021; Blanco-Cano *et al.*, 2016).



شکل ۸- تغییرات نسبت رطوبت MR (٪) در مقابل زمان (دقیقه) برای محصول سنجد برای فواصل مختلف از مواد تغییر فاز دهنده (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) در سرعت‌های هوای مختلف ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه

Fig. 8. Variations of MR(%) versus time (minutes) for Oleaster product at different distances of PCM (5, 10 and 15 cm) at different air velocities of 0.5, 1 and 2 m/s

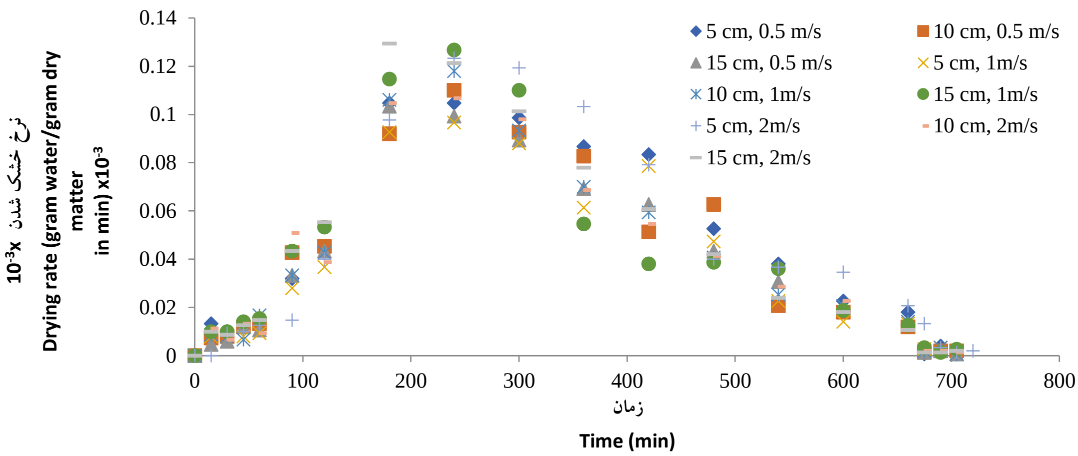
جدول ٤- مقادیر ثابت معادله هندرسون و پابیس به‌عنوان معادله ریاضی انتخاب شده از بین معادلات ریاضی مورد استفاده برای توصیف سینتیک خشک شدن سنجد و مقادیر آماری

Table 4- Constant values of Henderson and Pabis equation as a mathematical equation selected among the mathematical equations used to describe the drying kinetics of oleaser and statistical values

سرعت جریان هوا Air velocity ($m.s^{-1}$)	فاصله مواد تغییر فاز دهنده Distance between PCM (cm)	ثابت‌ها Constants	R^2	*RMSE*
0.5	5	k=0.00019, a=1.905	0.9916	0.03118
	10	k=0.00023, a=1.826	0.9900	0.03145
	15	k=0.00020, a=1.921	0.9906	0.03145
1	5	k=0.0033, a=1.195	0.9957	0.02397
	10	k=0.0036, a=1.193	0.9959	0.02347
	15	k=0.0035, a=1.203	0.9971	0.01946
2	5	k=0.0012, a=1.759, b=-0.67586	0.9842	0.04414
	10	k=0.0014, a=1.650, b=-0.6142	0.9909	0.03721
	15	k=0.0012, a=1.626, b=-0.6201	0.9935	0.03540

نرخ خشک شدن

تغییر نرخ خشک شدن نسبت به زمان در شرایط مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. در مرحله اولیه خشک شدن محصول نمونه‌های سنجد، میزان تبخیر رطوبت به‌دلیل محتوای بالای آب در سنجدها زیاد است و بخش عمده‌ای از فرآیند خشک کردن در این دوره اتفاق افتاد. پس از این مدت، رطوبت‌زدایی به‌دلیل کاهش آب آزاد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با پراکندگی فازهای مایع و بخار، جذب رطوبت اتفاق می‌افتد. عوامل مؤثر در این دوره پدیده مویرگی است که منجر به حرکت مولکول‌های آب به سطح محصول و سپس تبخیر می‌شود (Khazaei *et al.*, 2008). هنگامی که رطوبت‌زدایی نمونه‌ها وارد دوره دوم می‌شود، چروکیدگی رخ می‌دهد. در این صورت رطوبت آزاد از سطح نمونه‌ها از بین می‌رود و همین امر باعث تغییر شکل می‌شود. برای مواردی که سرعت خشک شدن بیشتر است، چروکیدگی به سرعت در آخرین دوره اتفاق می‌افتد، به‌خصوص زمانی‌که از PCM با گردش هوای بیشتر استفاده می‌شود. علاوه بر این، شکل ۹ نشان داد که سرعت خشک شدن با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد. با استفاده از PCM و برگرداندن بیشتر جریان هوا، هوا با انرژی حرارتی حجمی بالاتر وارد کابینت شده و در نتیجه رطوبت بیشتری از محصول خارج می‌شود. لازم به ذکر است برای رطوبت‌زدایی از هوای خروجی از کابینت خشک‌کن از پودر سلیکاژل استفاده گردید که در حین عبور از روی آن رطوبت هوا کاهش یافته و روند رطوبت‌زدایی از محصول انجام می‌گیرد.



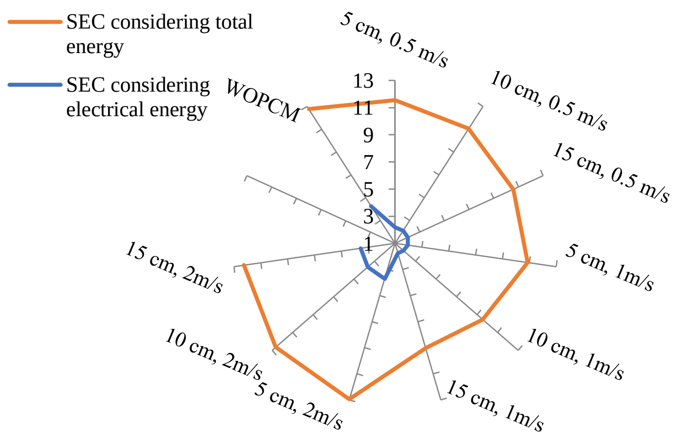
شکل ۹- تغییرات نرخ خشک شدن میوه سنجد با زمان در فواصل مختلف لوله‌ها با سرعت‌های مختلف

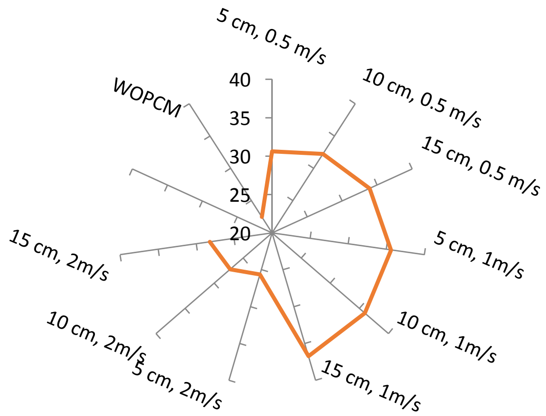
Fig. 9. Variations of the drying rate of Oleaster fruit with time at different distances of the tubes at different air velocities

بازده خشک کردن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که مصرف انرژی ویژه SEC و راندمان کلی دو پارامتر معروف برای این منظور هستند. با توجه به شکل ۱۰- الف، واضح است که SEC برای سیستم بدون PCM بیشتر از سایر موارد است و در حالت با ماده تغییر فازدهنده مقدار آن کاهش می‌یابد. به این معنی که با وجود PCM، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز برای خشک کردن ۱ کیلوگرم سنجد، کاهش محسوسی می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت جریان هوا از $۰/۵\ m.s^{-1}$ به ۱ در سامانه، SEC کاهش می‌یابد. اما با افزایش از $۱\ m.s^{-1}$ به $۲\ m.s^{-1}$ مقادیر آن به‌دلیل مصرف بالای انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. در این حالت با کاهش مدت زمان خشک شدن مقادیر انرژی مصرفی کل تا حدودی نیز کاهش می‌یابد. کمترین مصرف انرژی ویژه ($۹/۰۲\ MJ.kg^{-1}$) مربوط به خشک‌کن با PCM با فواصل لوله ۱۵ cm و سرعت هوای $۱\ m.s^{-1}$ بود. با افزایش فاصله بین لوله‌ها میزان اتلاف حرارتی در جمع‌کننده کاهش یافته و این انرژی برای خشک شدن محصول وارد کابینت می‌شود. همچنین شکل ۱۰–الف تغییرات SEC را برای سامانه بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی جمع‌آوری شده توسط جمع‌کننده (به‌عنوان انرژی رایگان) برای بررسی تأثیر سایر منابع انرژی بر خشک شدن را نشان می‌دهد. در این حالت، برای شرایط مختلف خشک کردن، مقادیر آن از $۱/۷۵\ MJ.kg^{-1}$ تا ۳/۷۲ متغیر است. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده $۴/۲۶\ MJ.kg^{-1}$ بود. علاوه بر این، راندمان کلی خشک‌کن با و بدون PCM در شکل ۱۰–ب نشان داده شده است. مطابق شکل، مشخص است که با افزایش فواصل بین لوله‌ها، بازده خشک کردن به‌دلیل کاهش زمان و انرژی مصرفی خشک شدن افزایش می‌یابد. در این حالت مصرف انرژی الکتریکی به‌وسیله فن (برای جریان سیال در خشک‌کن و جمع‌کننده) و انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن کاهش

می‌یابد. هر چند با افزایش سرعت هوا از $1\ m.s^{-1}$ به $2\ m.s^{-1}$ افت قابل ملاحظه‌ای در بازده خشک کردن به‌وجود می‌آید. بیشترین بازده خشک کردن به میزان ۳۶/۷۲٪ و کمترین آن ۲۵/۶۵٪ به‌ترتیب برای فاصله ۱۵ cm، سرعت هوای $1\ m.s^{-1}$ و فاصله ۵ cm، سرعت هوای $2\ m.s^{-1}$ بود. بازده خشک شدن با استفاده از ماده تغییر فازدهنده حداقل به میزان ۱۲ درصد بهبود پیدا کرد. نتایج به‌دست آمده با نتایج تحقیقات دیگر در زمینه استفاده از PCM برای خشک کردن محصولات مختلف تطابقت داشت (Bhardwaj *et al.*, 2020; Barghi *et al.*, 2022).





شکل ۱۰- الف). مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی خشک کردن خورشیدی سنجد در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییر فازدهنده

Fig. 10. a). SEC values (considering electrical energy and total energy), b) overall solar drying efficiency of oleaster at different air flow conditions and phase change material distances

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تجزیه و تحلیل روند حرارتی در سامانه خشک‌کن خورشیدی در سه موقعیت قرارگیری لوله‌های حاوی PCM در داخل جمع‌کننده صفحه تخت برای فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر بین لوله‌ها و سرعت جریان هوا درون سامانه در سه سطح $0/5\ m.s^{-1}$، ۱ و ۲ پرداخته شد. استفاده از سامانه جریان بازگشتی و ماده تغییر فازدهنده به صورت همزمان، باعث بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت به میزان ۱۹/۱۲ درصد شد. با توجه به مقدار انرژی حرارتی ذخیره شده و زمان خشک شدن کمتر، راندمان حرارتی بالاتر، بیشترین بازده خشک کردن به میزان ۳۶/۷۲ ٪ و کمترین آن ۲۵/۶۵ ٪ به‌ترتیب برای فاصله ۱۵ cm، سرعت هوای $1\ m.s^{-1}$ و فاصله ۵ cm، سرعت هوای $2\ m.s^{-1}$ بود. استفاده از PCM منجر به کاهش زمان خشک شدن سنجد در حدود ۸/۳۲ تا ۱۶/۶۴ درصد برای موقعیت ماده تغییر فازدهنده ۱۵ cm و سرعت ۲ متر بر ثانیه شد. مصرف انرژی ویژه برای خشک کردن سنجد مربوط به خشک‌کن با PCM در حالت قرارگیری ماده تغییر فازدهنده ۱۵ cm به اندازه ۱۴/۱۷ درصد نسبت به حالت WOPCM کاهش یافت.

References

1. Aghbashlo, M., Kianmehr, H., & Samimi-Akhijahani H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of beriberi fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion Management*, *49*, 2865–2871. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.009
2. Akbolat, D., Ertekin, C., Menges, H.O., Guzel, E., & Ekinci, K. (2008). Physical and nutritional properties of oleaster growing in Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, *20*, 2358-2366.
3. Antal, T., Tarek, M., Tarek-Tilistyak, J., & Kerekes, B. (2016). Comparative effects of three different drying methods on drying kinetics and quality of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, *41(3)*, 2374-2385. https://doi.org/10.1111/jfpp.12971
4. Atalay, H. (2020). Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for solar energy-assisted drying process. *Solar Energy*, *198*, 124-138. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.051
5. Babar, O., Arora, A.K., Nema, P.K., & Kasara, A. (2021). Effect of PCM assisted flat plate collector solar drying of green chili on retention of bioactive compounds and control of aflatoxins development. *Solar Energy*, *229*, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.077
6. Barghi, M.S., Iranmanesh, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2022). Thermo-economic analysis of solar drying of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) integrated with evacuated tube solar collector and phase change material. *Journal of Energy Storage*, *52*, 104688. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104688
7. Bhardwaj, A.K., Kumar, R., Chauhan, R., & Kumar, S. (2020). Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region. *Thermal Science and Engineering Progress*, *20*, 100713. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100713
8. Blanco-Cano, L., Soria-Verdugo, A., Garcia-Gutierrez, L.M., & Ruiz-Rivas, U. (2016). Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, *108*, 1086-1094. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.001
9. Boudraa, S. (2020). Impact of microwave-grill-drying (MWGD) on functional properties of berry Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Bioenergy and Food Science*, *7(1)*, 1-13. https://doi.org/10.18067/jbfs.v7i1.275
10. Chamoli, S., Chauhan, R., Thakur, N.S., & Saini, J.S. (2012). A review of the performance of double pass solar air heater. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, *16(1)*, 481-492. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.012
11. Dorouzi, M., Mortezapour, H., & Akhavan, H.R. (2018). Tomato slices drying in a desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy*, *162*, 364-371. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.025
12. Ebrahimi, H., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2021). Improving the thermal efficiency of a solar dryer using phase change materials at different position in the collector. *Solar Energy*, *220*, 535-551. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.054
13. El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air with PCM. *Journal of Cleaner Production*, *148*, 37-48. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149
14. Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., & Alghannam, A.O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, *116*, 594-605. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.007
15. Esakkimuthu, S., Hassabou, A.H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, *88*, 144-153. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.006
16. Gertzos, K.P., & Caouris, Y.G. (2007). Experimental and computational study of the developed flow field in a flat plate integrated collector storage (ICS) solar device with recirculation, Exp. *Thermal Fluid Science*, *31(8)*, 1133–1145. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.12.002
17. Goyal, R.K., Tiwari, G.N., & Garg, H.P. (1998). Effect of thermal storage on the performance of an air collector: a periodic analysis. *Energy Conversion Management*, *39*, 193–202. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9
18. Hamidpour, R., Hamidpour, S., Hamidpour, M., Shahlari, M., Sohraby, M., Shahlari, N., & Hamidpour, R. (2017). Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.): From a variety of traditional medicinal applications to its novel roles as active antioxidant, anti-inflammatory, anti-mutagenic and analgesic agent. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, *7(1)*, 24-29. https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2015.09.004
19. Iranmanesh, M., Samimi-Akhijahani, H., & Jahromi, M.S.B. (2020). CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*, *145*, 1192-1213. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038

20. Kalogirou, S.A. (2006). Prediction of flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks. *Solar Energy*, *80(3)*, 248-259. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.003
21. Koca, A., Oztopb, H.F., Koyunc, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, *33*, 567–574. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012
22. Motahayyer, M., Arabhosseini, A., & Samimi-Akhijahani, H. (2019). Evaluation of solar cabinet dryer equipped heat exchanger and porous plate. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *50*, 305-318. https://10.22059/IJBSE.2019.264036.665085
23. Raj, A.K., Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2019). A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM capsules for drying applications. *Applied Thermal Engineering*, *146*, 910-920. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055
24. Rashidi, S., Kashefi, M.H., & Hormozi, F. (2018). Potential applications of inserts in solar thermal energy systems – a review to identify the gaps and frontier challenges. *Solar Energy*, *171*, 929–52. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.017
25. Rashidi, M., Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., & Kermani, A.M. (2021). Acceleration the drying process of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) using reflectors and desiccant system in a solar drying system. *Renewable Energy*, *171*, 526-541. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.094
26. Sahan, Y., Gocmen, D., Cansev, A., Celik, G., Aydin, E., Dunda, N.A., Dugler, D., Kaplan, H.B., Kilci, A., & Guncer, S. (2015). Chemical and techno-functional properties of fours from peeled and unpeeled oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *88*, 34–41. https://doi.org/10.5073/JABFQ.2015.088.007
27. Salami, P. (2016). Design and construction of the PVT system to increase the energy efficiency of solar flat plate collector. Ph.D. Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
28. Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. *Solar Energy*, *134*, 429-444. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.030
29. Toğrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, *55(3)*, 209-216. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00065-1
30. Tyagi, V.V., Panwar, N.L., Rahim, N.A., & Kothari, R. (2012). Review on solar air heating system with and without thermal storage system. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, *16(4)*, 2289-2303. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.005
31. Wang, Y., Xu, J., Liu, Q., Chen, Y., & Liu, H. (2016). Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al_2O_3/synthetic oil nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, *107*, 469–78. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.170
32. Yadav, C.O., & Ramana, P.V. (2020). Experimental investigation of the solar dryer using phase-change material. *Renewable Energy and Climate Change*, *161*, 185-197. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9578-0.17